

## **Biolixiviación nueva: La opción Metalúrgica**

Ing. Melitón Alpaca Arena

Resulta irónico hablar de que la novísima forma de obtener metales puros sea realizada con la ayuda de los más antiguos organismos del planeta. En efecto las bacterias más comúnmente usadas en la lixiviación son en realidad arqueobacterias, es decir las formas más antiguas y primitivas de vida y una que según una clasificación moderna de la Biología, forman un dominio de la misma. A mediados de los 70 los avances en la secuencia genética descubrieron la gran diversidad del mundo microbial y como resultado las viejas clasificaciones han sido reemplazadas por un árbol de tres dominios: Arqueo bacteria, Bacteria y Eukarya. La rama de las Eukarya organismos hechos de células con núcleo, es donde la vida animal, vegetal así como las algas y hongos encajan. La segunda rama la forma las Bacterias, y aunque la mayoría son letales al hombre muchos de ellas han resultado ser el compañero ideal del hombre en su lucha por descontaminar el medio ambiente. Finalmente se tiene la rama de las Arqueo bacterias, que según el parecer de muchos científicos son las primeras formas de vida que se originaron en las fisuras marinas y las aguas termales abismales, lejos de la presencia de la luz. Las bacterias más comúnmente usadas en la lixiviación bacteriana son Thiobacillus. La presencia de Thiobacillus Ferroxidans en las aguas de drenaje de las minas de carbón y su correlación con la disolución de minerales, recién se hizo patente en el año 1957. La presencia de microorganismos en un medio tan hostil, así como la existencia de metal soluble y ácido sulfúrico, causó estupor en su momento y aun escepticismo.

Las posteriores pruebas contundentes mostraron que no solo las bacterias podían vivir en ese ambiente sino que realizaban un tipo de lixiviación natural hasta entonces inédito. Las bacterias Thio-Ferroxidans son acidófilas y tienden a vivir en ambientes tales como las aguas termales, fisuras volcánicas y depósitos de sulfuros que tienen una alta concentración de ácido sulfúrico y son moderadamente termofílicas viviendo entre 20 a 35°C. La arqueobacteria obtiene energía para su desarrollo de la oxidación del hierro y azufre. El hierro divalente (ferroso) es convertido a hierro férrico (trivalente); mientras que el azufre elemental y los sulfuros son transformados a compuestos donde el azufre tenga menor número de electrones: el ión sulfato.

Las autotróficas bacteria Thio-Ferroxidans capturan carbón del CO<sub>2</sub> de la atmósfera; en adición a estas existen otras bacterias heterotróficas que requieren materia orgánica disponible. En ambas especies hay bacterias aeróbicas que efectúan principalmente reacciones de oxidación y bacterias anaeróbicas que llevan a su ciclo de vida en ausencia del oxígeno y realizan esencialmente reacciones de reducción.

En la lixiviación bacteriana existen otros organismos que actúan con las thioferrooxidans, tales como las thiobacillus thiooxidans, arqueobacteria que se desarrolla en el azufre elemental y en algunos compuestos sulfurosos solubles. Similarmente los microorganismos lethospirillum ferrooxidans y los thiobacillus organopurpureus, pueden también degradar pirita y chalcopirita.

Entre las temperaturas de 60 y 75°C en condiciones naturales la bacteria thermotrix Thiopara oxida los iones sulfihídricos a iones sulfito y tiosulfato a azufre elemental para formar luego iones sulfato. Lo más robustos microorganismos de las especies termofílicas son las del género sulfalobus. Estas florecen en las aguas termales y fisuras volcánicas a temperaturas que exceden los 60°C inclusive algunas de ellas cerca del punto de ebullición del agua, las paredes de estos microorganismos tienen una estructura diferente de la mayoría de sus congéneres.

Las arqueobacteria sulfalobus acidocaldarius y la sulfalobus brierleyi oxidan azufre y hierro por la energía yacente del  $\text{CO}_2$  y como cualquier organismo aeróbico el oxígeno es requerido, que finalmente resulta en el receptor de los electrones removidos en el proceso de oxidación.

Los minerales que pueden resistir la acción de otros microorganismos son atacados por los sulfalobus, tal es el caso de la chalcopirita y la molibdenita. El molibdeno es muy tóxico para la mayoría de los microorganismos lixiviantes, es disuelto por la sulfalobus brierleyi en concentraciones tan altas como 750 mg por litro. Las sulfalobus representan posiblemente la mayor promesa de éxito en el futuro de la lixiviación bacteriana.

El uso controlado de microorganismos para la extracción de metales, también se extiende para aplicaciones de tecnología biológica como por ejemplo para eliminar metales pesados de las aguas industriales. Se han estudiado bacterias y hongos que acumulan iones presentes en los desagües. Los procesos microbiológicos involucrados pueden considerarse de tres categorías: absorción de los iones metálicos sobre la superficie de los microorganismos; penetración intracelular de los metales por agentes biológicos. La mayoría de los microorganismos tiene una carga negativa debido a la presencia de iones negativamente cargados en la membrana celular, tales grupos incluyen al fosforil  $\text{PO}^3$ , el carboxil  $\text{CO}^-$ , el sulfihidril  $\text{HS}^-$  y el hidroxil  $\text{OH}^-$  que son los responsables de los iones metálicos positivos.

La bacteria común de la cerveza saccharomyces cerevisiae y el hongo rhizopus arrizus han mostrado habilidad para absorber uranio de los efluentes.

Por otra parte la penetración intracelular de metales ocurren en algunos microorganismos; así la bacteria filamentosa spilaerotilus leptothrix y la polifórmica hypomicrobium pueden ser incrustados con manganeso, mientras que la galliohella lo hace con hierro; igualmente las pedromicribum se distinguen por encapsular en su interior delgadas láminas de oro, es decir cubren sus sinuosos y

estrechos pasajes con oro, las razones por las cuales estas bacterias realizan un suicidio masivo son desconocidas.

Finalmente el otro mecanismo de transformación de los metales por medio de agentes biológicos resulta en una interesante aplicación; muchos microorganismos sintetizan compuestos específicos de quelación que inmovilizan metales pesados que luego incorporan como compuestos volátiles que pueden ser evaporados.

La metilización es un ejemplo y es la sustitución de un átomo del metal por el hidrógeno que proviene del hidroxilo de una molécula de alcohol metílico que puede resultar en un compuesto volátil. Entre los metales que pueden sujetarse a la biometilización se incluye el Hg, Se, As, Sn, Pb y Cd y se han encontrado métodos que permiten que también el Pt, Pa, Au y Ta pueden ser transformados en esa forma. Muchos organismos tienen componentes que son altamente específicos para algún metal y uno de los mayores agentes de ligazón es la proteína Metallthionina.

La lixiviación bacteriana de los metales puede considerarse como una lixiviación química asistida por las bacterias como catalizadores. Por convención la lixiviación bacteriana ha sido clasificada en directa o indirecta.

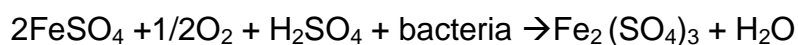
La lixiviación directa ocurre por el ataque enzimático de las bacterias sobre los componentes del mineral que son susceptibles a la oxidación los electrones liberados por la oxidación con transportados a través del sistema proteico de la membrana celular y de ahí (en organismos aeróbicos) a los átomos de oxígeno, es bueno recordar que en los sistemas biológicos la oxidación suele corresponder a la eliminación del hidrógeno. Se conoce que la energía metabólica de la oxidación del sustrato es transferida al trifosfato de adenosina (ATP) que es la energía regular de la célula, que la usará para su crecimiento y multiplicación.

En la lixiviación indirecta no ocurre un ataque frontal de la bacteria sobre la estructura atómica del mineral, en su lugar la bacteria oxida el hierro soluble (ferroso) a hierro férrico y a su vez a sulfato férrico, que es un poderoso oxidante que reacciona con los metales transformándolos a una forma soluble. Las ecuaciones involucradas son las siguientes:

El sulfuro por acción de las bacterias. y en presencia del oxígeno se transforma en sulfato ferroso y ácido sulfúrico



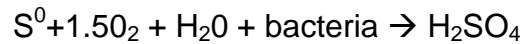
El ácido sulfúrico actuando sobre el sulfato ferroso y con la ayuda de las bacterias thioxidans produce sulfato férrico.



El sulfato férrico con la ayuda catalítica de las bacterias lixivia el mineral formando sulfato ferroso, azufre elemental y sulfato del metal



el azufre permanece en la superficie del sulfuro formando una barrera de difusión y luego se combina con el oxígeno y el agua para formar ácido sulfúrico con la ayuda de las bacterias thiooxidans



La lixiviación ya sea directa o indirecta es difícil de diferenciar porque esencialmente la mayoría de los minerales incluye algún hierro y azufre. Aunque el proceso empiece directamente algún hierro es liberado y se establece una lixiviación indirecta, cuando se forma azufre las bacterias thiobacillus thiooxidans juegan un rol indispensable en la oxidación del azufre para formar ácido sulfúrico.

El control de la acidez es de la mayor importancia, porque se necesita un medio ácido para tener el ión férrico y otros metales en solución. La acidez es por lo tanto controlada por la oxidación del hierro y el azufre y los sulfuros de los metales.

En las operaciones comerciales de lixiviación millones de toneladas de mineral de baja ley son acumuladas en el lugar de tratamiento ya sea camiones, trenes o fajas transportadoras. El piso de esta acumulación ha sido previamente impermeabilizado ya sea con arcilla asfalto o membranas plásticas denominadas geomembranas, esto sirve para recolectar el licor de lixiviación así como para impedir cualquier contaminación al subsuelo. Las impresionantes acumulaciones de mineral son regadas con cientos de galones de soluciones lixiviantes ya sea por aspersión o por goteo. La aspersión introduce aire necesario en la oxidación química y la oxidación biológica. Los amontonamientos de mineral son entonces regados con las bacterias lixiviantes, estos microorganismos una vez adaptados al medio ambiente se multiplican llegándose a contar por millones de centímetros cúbico.

La solución lixivante percola a través de la masa de mineral y la solución enriquecida son recogidas en el fondo y de esta solución se recupera el metal ya sea por cementación o por los procesos de extracción por solvente. En los procesos a gran escala las operaciones pueden durar varios años. Muchos veces lixiviación se ve limitada por el tamaño de las rocas que impiden la eficiente disolución de todo el metal presente, mientras que la presencia de yeso,  $Fe(OH)_3$  y sulfato de hierro básico que dificultan la permeabilidad de la pila.

Algunos factores que influyen negativamente en la lixiviación son la presencia de metales pesados, particularmente los iones Ag, Hg y Mn, que son venenosos para las bacterias; además la existencia de temperaturas muy altas muchas veces como consecuencia de las reacciones exotérmicas propias, son inconvenientes para algunos tipos de bacterias. Mejores métodos para la extracción de los

metales lo forman, los de lixiviación por pilas usados en la actualidad en la extracción de los sulfuros de cobre. En este método se prefiere triturar el mineral para aumentar su superficie de ataque y algunas veces cuando hay la presencia excesiva de finos se aglomera el material antes de enviarlo a las pilas. El piso de las pilas recibe un tratamiento previo de impermeabilizado colocando, además membranas de material plástico; el piso de la pila está dotado de una cierta inclinación que va a permitir al licor de lixiviación fluir por gravedad; sistemas aereación a menudo se instalan para aumentar el flujo de aire. Se acumula el mineral en forma de pilar de gran dimensión y se le riega ya sea por aspersión o por goteo con la solución bacteriana, igual que en el caso anterior la solución rica en el metal valioso es recogida en el fondo para luego recuperar el valor por los métodos conocidos ya mencionados. Aunque la lixiviación bacteriana es corrientemente aplicada para la recuperación del cobre y el uranio, sin embargo están ya siendo usada para la recuperación de otros materiales sulfurosos, como en el tratamiento de la esfalerita y la galena que son sulfuros de zinc y de plomo respectivamente. En el Perú (Tamboraque) se está haciendo uso de la lixiviación bacteriana para el tratamiento de la arsenopirita y pirita aurífera contenido en bastos depósitos de relaves, la lixiviación bacteriana descompone la arsenopirita logrando que el oro entrampado quede libre y por lo tanto en condiciones de ser disuelto por el cianuro, en la forma tradicional de recuperarlo. También está demostrado la posibilidad de lixiviar los concentrados de plomo y de zinc, los sulfuros son oxidados por las bacterias Ferroxidans, habiéndose detallado que en el caso del zinc, los sulfuros tipo marmatítico, son los más rápidamente lixiviados lo cual se explica por el hierro que contiene la molécula de marmatita.

Una de las mayores aplicaciones de la biolixiviación se ha encontrado en el campo de los grandes depósitos de material de muy baja ley y que han sido acumulados como desmonte en las operaciones de tajo abierto. En este sentido la biolixiviación bacteriana acompañada de lixiviación química está siendo aplicada con éxito en Toquepala (Perú) donde los licores de lixiviación de los botaderos de Cuajone y Toquepala son tratados en la planta de extracción por solvente y electrodeposición para añadir 30000 toneladas anuales de cobre a la producción de cobre electrolítico de Southern Perú Copper Corporation.

Por lo demás el proceso de lixiviación bacteriana tiene ya algunos años de aplicación en Cerro Verde (Arequipa) con resultados halagadores. El mayor impedimento a la lixiviación bacteriana ha sido la lentitud del proceso, debido esencialmente a que las bacterias como seres vivientes están sometidas a los embates del medio ambiente y son particularmente sensibles a variaciones de humedad y temperatura extremas. La biolixiviación será más sencilla para las especies nativas siempre presentes en los depósitos, pero estas no se reproducen en gran escala por esto es necesario preparar cepas artificiales en el laboratorio, con las características de las nativas y que son finalmente las bacterias que se regaran sobre el material. En las posibilidades actuales de manipulación genética es de esperarse el nacimiento de bacterias con mejores características. La lixiviación bacteriana resulta en el reto más importante en el futuro de la Metalurgia, los métodos tradicionales de recuperación de metales deberán dar

paso a métodos no contaminantes y la biolixiviación es uno de ellos y que debe responder a la exigencia de un mundo atribulado que clama por un ambiente que no contamine más.